激光干涉仪引力波探测器的特色建设及运营模式研究*

蒿巧利[1,2] 赵晏强[1,2] 周伯柱[1,2] 李印结**[1,2]

（1. 中国科学院武汉文献情报中心，武汉 430071；2. 科技大数据湖北省重点实验室，武汉 430071）

摘要：2015 年激光干涉仪引力波天文台（Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory，LIGO）直接检测到引力波信号，为新物理学和天体物理学带来希望的同时，也掀起激光干涉仪引力波探测器发展的新浪潮。在激光干涉仪引力波探测器从地面到太空蓬勃发展的大背景下，本文从建设历程、技术特色和发展定位、运营模式等方面，开展各探测器的对比研究，归纳出激光干涉仪引力波探测器建设和运营的经验启示，即：激光干涉仪引力波探测器的建设是长期化工程，有助于推动科研容错机制和科学评价机制的完善发展；激光干涉仪引力波探测器的建设是高科技工程，有助于推动多学科技术协同发展；激光干涉仪引力波探测器的建设是国际化工程，有助于推动科研合作健康发展。

关键词：引力波探测器；激光干涉仪；长期；高科技；合作

General Analysis of Laser Interferometer Gravitational Wave Detectors*

HAO Qiaoli[1,2], ZHAO Yanqiang[1,2], ZHOU Bozhu[1,2]，LI Yinjie[,1,2]**

(1. Wuhan Library, Chinese Academy of Sciences，Wuhan 430071, China；2.Hubei Key Laboratory of Big Data in Science and Technology，Wuhan 430071, China)

Abstract： Gravitational wave signals were directly detected by the Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) in 2015, bring hope to new physics and astrophysics and setting off a new wave of the development of laser interferometer gravitational wave detectors. In the background of the vigorous development of the interferometer gravitational wave detectors from ground to space, a comparative study of each detector are carried out from the aspects of construction history, technical characteristics and development positioning, and operation mode. And the experiences and enlightenments of the construction and operation of laser interferometer gravitational wave detectors are further summarized, namely: the construction of laser interferometer gravitational wave detector is a long-term project, which helps to promote the perfect development of scientific research fault tolerance mechanism and scientific evaluation mechanism; the construction of gravitational wave detector is a high-tech project, which helps to promote the coordinated development of multidisciplinary technologies; the construction of laser interferometer gravitational wave detectors is an international project, which helps to promote the healthy development of scientific research cooperation.

Key words: Gravitational Wave Detector; Laser Interferometer; Long-term; High-tech; Cooperation

1915 年爱因斯坦根据广义相对论预言宇宙中存在引力波[1]。1962 年美国物理学家韦伯领导建成第一个引力波探测器—共振棒；同年俄国物理学家麦可·葛特森希坦与弗拉基斯拉夫·普斯投沃特提议建造干涉仪来寻找引力波[2]。进入

***liyinjie@whlib.ac.cn

21 世纪，共振棒探测器由于灵敏度低、探测频率低等问题陆续退出历史舞台，而干涉仪引力波探测器却进入黄金发展期。特别是，2015 年 9 月 14 日 LIGO 首次检测到两个恒星质量黑洞合并产生的引力波[3]，随后 LIGO、Virgo 又宣布对另外几个黑洞系统以及中子星合并的探测[4, 5]，开辟了引力波探测的新时代。

国际上激光干涉仪引力波探测器的快速发展吸引了国内学者的高度关注。罗子人[6]等对空间激光干涉测距系统及无拖曳航天技术等两大空间激光干涉引力波探测技术进行了详细剖析。王永运[7]等论述了第三代激光干涉仪引力波探测器与第一代、第二代探测器的不同，并介绍了第三代探测器关键部件和关键技术的预制研究情况。冯衍[8]详细介绍了 LIGO 的光学与激光技术。李永贵[9]等介绍了激光干涉仪检测引力波的原理、方法和关键技术。胡文瑞[10]分析了基于太阳轨道和地球轨道的两种不同的空间引力波探测方案。唐川[11]等

出我国在开展引力波探测工作时，要注重学习 LIGO 建设和使用信息技术基础设施的经验。魏韧[12]等采用文献计量的方法分析了引力波领域国际发展态势。

整体来看国内学者倾向于关注激光干涉仪引力波探测相关技术的发展，针对现有激光干涉仪引力波探测器的系统研究和对比研究相对较少[13-15]。考虑到我国激光干涉仪引力波探测器发展滞后多年，激光干涉仪引力波探测器的建设又是十分庞大的科学工程，当此之时对国内外主要激光干涉仪引力波探测器的建设历程、特色定位、运营模式等进行系统化对比研究，将有助于推动我国引力波天文学事业的科学健康发展。

1　引力波探测器建设历程

LIGO 上世纪 70 年代，美国麻省理工开展了千米级激光干涉仪的相关研究并评估了其噪声源[16]。1979 年美国国家科学基金会资助加州理工和麻省理工进行激光干涉仪的研发，1984 年加州理工/麻省理工联合项目 LIGO 立项。1990 年美国国家科学委员会批准 LIGO 建设提案，决定先建造初级 LIGO 初步实现大型激光干涉，然后建造高级 LIGO 大幅提高干涉仪的灵敏度和各项性能。1994-1995 年分别位于华盛顿州的汉福德与路易斯安那州的利文斯顿的两个 LIGO 观测站（LIGO Hanford 和 LIGO Livingston）开始建设。1999 年初级 LIGO 建设完成，2002 年初级 LIGO 首次运行。2002-2010 年期间初级 LIGO 从未检测到引力波。但是有关如何操作、维护和改进世界上科技含量最高的测量设备之一的经验和教训是无法估量的。基于前期运行教训，干涉仪被全面重新设计，并于 2010-2014 年间升级改造为高级 LIGO。高级 LIGO 的灵敏度比初级 LIGO 提高了 10

，探测距离比初级 LIGO 远 10

，采样空间比初级 LIGO 增大 1000

。

Virgo 上世纪 80 年代初法国国家科学研究中心和意大利国立天体物理研究所决定合作开发以激光干涉为基础的大型引力波探测仪器。1989 年 Virgo 方案

正式提出，1994 年提案获批，1997 年设计完成，2003 年位于意大利比萨附近的欧洲引力天文台内的初级 Virgo 完工，2007 年初级 Virgo 启动运行，但未检测到引力波信号。考虑到即使能够实现引力波的首发检测，初级 Virgo 的灵敏度也不足以每年检测超过 0.1 个事件。于是 2012 年 Virgo 启动升级改造，其首要目标在于将灵敏度提高到初级 Virgo 灵敏度的 10

，将可检测事件的发生率提高 1000 倍。2017 年高级 Virgo 建造完成。

GEO600 1994 年英国和德国提出联合建造一台臂长 600 m 的激光干涉引力波探测器 GEO600。1995 年 GEO600 在德国汉诺威附近开始建设。2002 年 GEO600 开始调试运行，2006 年达到设计灵敏度，不过一直未检测到引力波信号。为提高高频信号的探测灵敏度及开展先进技术研发，2009 年 GEO600 启动升级改造，其升级过程即 GEO-HF。2014 年 GEO600 升级完成。

KAGRA 1995 年东京大学在日本国家天文台三鹰校区开始建造臂长 300 m 的激光干涉仪原型 TAMA300[17]，1998 年 TAMA300 作为当时最大最灵敏的引力波探测器开始运行。进入本世纪日本又研发出臂长 100 米的低温冷却镜原型机 -- 低温激光干涉仪天文台（Cryogenic Laser Interferometer Observatory，CLIO）[18]，以验证低温操作的可行性。2010 年，日本国会批准神冈引力波探测器（Kamioka Gravitational Wave Detector，KAGRA）大型低温引力波望远镜（Large-scale Cryogenic Graviational Wave Telescope）项目。2019 年 10 月 4 日位于日本神冈隧道内的 KAGRA 建造完成。2019 年底 KAGRA 开始运行。

ALGO 澳大利亚干涉引力天文学联合会提倡在澳大利亚建造南半球引力波探测器。目前澳大利亚国立大学与西澳大学合作在珀斯已启动澳大利亚国际引力天文台项目 （Australian International Gravitational Observatory，ALGO）。根据计划[19]，ALGO 将建在菁菁研究设施（Gingin research facility）所在的瓦林普平原（Wallingup plain）上。

ET 2008 年法国、德国、意大利、荷兰、波兰、英国、美国、欧洲天文台等提出打造灵敏度为 10^{-24} 的、第三代引力波探测器爱因斯坦望远镜（Einstein Telescope，ET），目前项目组已连续召开 10 届研讨会。根据计划 ET 将于 2025 年建成。

LISA 1993 年欧洲空间局提出激光干涉仪空间天线（Laser Interferometer Space Antenna，LISA）。1997 年美国国家航空航天局加入 LISA 计划，2011 年退出后于 2017 年再次加入。

LISA 计划的顺利推进是以 LISA 探路者（LISA Pathfinder）的成功运转为基础的。2015 年 12 月 3 日 LISA 探路者发射。作为 LISA 的概念证明，LISA 探路者旨在测试航天器中自由漂浮物质的噪声特性与预期的引力波信号相比是否足够小。2017 年 LISA 探路者完成任务，测试结果显示低噪声水平已超过了设计要求，表明 LISA 的关键技术研发进展顺利。根据计划，LISA 将于 2034 年升空。

其它 利用空间激光干涉仪探测中低频引力波是当今天文物理学家十分关

注的问题，除 LISA 外其它空间激光干涉仪探测方案也相继被提出。比如中国科学院提出“太极计划”[20]。根据计划，中科院将参加 LISA 双边合作计划，独立发射卫星组与 2035 年发射的 LISA 卫星组互为补充、检验。另外，中山大学提出 “天琴计划”[21]，日本提出分贝赫兹干涉引力波天文台（DECi-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory，DECIGO）计划[22]，美国在“超越爱因斯坦”计划（Beyond Einstein）[23]中提出“大爆炸观测器”（Big Bang Observer，BBO）任务。

2 引力波探测器特色定位

LIGO 根据《LIGO 实验室宪章》定义，LIGO 的任务是通过直接检测引力波来打开引力波天体物理学领域。LIGO [24]的运行频率为 10 Hz 至 1000 Hz，拥有 LIGO Hanford 和 LIGO Livingston 两个相距 3002 km、几乎相同的探测器以减少信号误判。每个探测器的核心均在于由两个 L 型长臂构成的迈克尔逊干涉仪。长臂内部的反射镜结构使得每束激光在与另一束激光合并之前，沿全长 4 km 的长臂来回反射约 400 次。经过多次反射之后每束激光行进的距离从 4 km 增大到 1600 km，能够测量 10^{-19} 米的距离。对如此微小距离的精准测量，依赖 LIGO 先进而极具特色震动隔离系统、真空系统、光学组件和计算基础架构以处理 LIGO 收集的令人难以置信的数据量。

LIGO 震动隔离系统分为主动和被动两部分。其主动隔离系统首先通过并排工作的传感器监测各种环境振动，然后基于传感信息的精确计算，产生一个反向运动以消除振动；被动隔离系统借助 4 级摆配置，进一步吸收主动隔离系统未完全抵消的任何移动，将所有重要的镜子保持完美静止。LIGO 的真空体积仅次于瑞士大型强子对撞机，借助涡轮泵真空吸尘器、离子泵等手段，LIGO 可以实现万亿分之一个大气压的高真空。LIGO 还具有最稳定的激光器，光源经过连续多级放大后仍具有非常好的单色性。此外，LIGO 的镜子采用最好的材料和最优的形状。镜子由纯度非常高的熔融石英玻璃制成，以确保高反射率、低热噪声和小形变；抛光镜表面与理论设计之间的差异以原子计，以确保激光束的高准直性。LIGO 的超级计算机网络可以对每天新增 TB 级的数据进行存储和归档，庞大的计算基础架构可以提供 MSU 量级的服务周期。

Virgo Virgo 项目旨在直接探测引力波。10 Hz 到 6000 Hz 的运行频率加上极高的灵敏度使 Virgo 能够检测到由超新星产生的以及由银河系和外星系（例如 VIRGO 星团）中双星系统合并产生的引力波。Virgo[25]与 LIGO 类似，本质是由两个 3 km 长的干涉臂构成的迈克尔逊激光干涉仪。激光束由分束器分成两个相等的组分，随后被分别送至干涉臂中。每个干涉臂中由一个双反射镜法布里-珀罗谐振腔将光学长度从 3 km 延长至 120 km。干涉臂被大大增长，引力波引起的微小距离变化得以放大。Virgo 项目在大功率超稳定激光器、高反射镜、地震隔离以及位置和对准控制领域开发了最先进的技术。在光学领域，Virgo 使用了新一代超稳定激光器和有史以来最稳定的振荡器。为生产结合最高反射率（超过 99.999%）和纳米表面控制的超高质量反射镜，Virgo 团队还建立了专门

的光学镀膜设施。为避免地震噪声引起的乱真运动，每个光学组件都被一个高 10 m、异常复杂的复合摆系统隔离。为避免残留气体的轻微干扰， Virgo 干涉仪被打造成欧洲最大的超高真空容器，光束在超高真空中传播，运行环境比绕地球飞行的航天器还要安静。

GEO600 GEO600 项目旨在通过臂长 600 m 的激光干涉仪直接检测 50 Hz 到 1500 Hz 频段的引力波，不过目前它的精度还不足以探测到引力波信号。除了开展引力波搜索工作外，目前 GEO600 还是国际引力波研究界的关键技术开发中心，经过 GEO 测试的技术已用于世界上所有大型引力波探测器中。GEO600 的科学家将激光稳定、无吸收光学、控制工程、减振以及数据采集和处理等可用技术推向了极限。GEO600[26]的特色在于激光功率和信号强度的放大，称为“双重循环”。借助高反射镜，用于干涉的激光与其自身进行结构性叠加，实现激光增强（“功率循环”）；借助附加反射镜，探测信号与其自身叠加，实现信号放大（“信号回收”）。上述技术还允许将检测器调谐到特定频率。另外，借助玻璃纤维实现镜子的悬挂结构也是 GEO600 的许多突破性技术之一。GEO600 也是第一个使用压缩激光以提高灵敏度的引力波探测器。除此以外，GEO600 还采用输出模式清洁器，并对光学器件的热翘曲进行补偿等。

KAGRA KAGRA 项目旨在频繁检测来自遥远星系的引力波，并获得有关宇宙的独特信息。同时作为一种高度灵敏的引力波探测器， KAGRA 将与 LIGO、Virgo 等一起，共同组成分布更广泛的全球探测网络。KAGRA[27]与 LIGO、Virgo 的工作原理相同，它采用四个反射镜沿着两个长 3 km 的高真空管多次反射红外激光束，以此长基线迈克尔逊激光干涉仪探测引力波。KAGRA 的独特之处在于：（1）建于 200 多米的地下深处，是世界上第一个地下引波探测器，其地下地震噪声通常比地上噪声小两个数量级；（2）采用低温技术将反射镜保持在 20 K 低温下，以减少材料热振动产生的噪声，因此 KAGRA 特别适合探测约 100 Hz 以下的引力波信号；（3）将蓝宝石用作镜面材料，因为它在低温下具有出色的光学和热学性能。

ALGO 两个 LIGO 站点、Virgo 和 GEO600 均位于北半球且纬度相近，导致现有引力波探测网络在垂直于美国和欧洲连线方向上的角分辨率很差，极化信息也很差。信息的缺失使得有关引力波源的许多问题无法解决。而 ALGO[19]作为南半球探测器，不仅可以显著地提高引力波源的角度分辨率，更能最大程度地提高网络基线，提高灵敏度和天空覆盖范围。由于以高级 LIGO 为基础进行开发设计，因此除了可能使用光纤模式清洁器外，AIGO 光学配置与高级 LIGO 几乎完全相同。另外，ALGO 与高级 LIGO 的技术指标也十分接近，不过尤其适合探测 4-20 Hz 的引力波信号。

ET 第一代探测器（初级 LIGO、初级 Virgo、GEO600 以及 TAMA300 等，灵敏度 10^{-22}）从原理上验证了激光干涉仪用于引力波探测的可行性，第二代探测器（高级 LIGO、高级 Virgo、GEO-HF、KAGRA 等，灵敏度 10^{-23}）已成功探测到引力波，开启了引力波天文学的新领域。而 ET [28]作为第三代探测器，其

定位在于通过进一步提高探测灵敏度，开展精确的引力波天文学研究。根据计划，ET 将位于地下 100 多米深的隧道中并采用低温技术，拥有组成等边三角形的三个长 10 km 的干涉臂，每两个干涉臂组成一台探测器，三台探测器将探测窗口拓展到 10 Hz 以下，覆盖地球上可检测的所有频率--1 Hz 到 10 kHz。其中一台探测器检测 2 Hz 至 40 Hz 的低频分量，另两台将检测高频分量。

LISA 与地面探测器不同，空间引力波探测器 LISA[29]不仅可以避免来自地球的噪声，并且能够借助极长的干涉臂探测从地球无法到达的较低频段。因此 LISA 所寻找的引力波波长更长，对应的物体运动轨道更宽，并且可能比 LIGO 所寻找的物体重得多，从而将检测领域推向了更大范围的引力波源。LISA 可能发现的引力波源包括银河系中的超紧凑型双星、超大质量黑洞合并、极高质量比气旋以及其它奇特的可能性事件。LISA 选择太阳轨道 3 颗星的激光测距方案，三架航天器在太空中组成等边三角形，与地球一起环绕太阳运转。航天器之间的路径（5×10^6 km）即干涉臂，星载激光器通过测量路径的变化来寻找 0.1 mHz 至 1 Hz 之间的引力波。LISA 团队通过 LISA 探路者验证了开发空间引力波探测器所需的基本技术。LISA 探路者包括用作测试质量的真空悬挂的两个金铂立方体、用于监视测试质量与卫星相对位置的电容式传感器、用于测量两个测试质量相对位置以及姿态的激光干涉测量法、以及混合微牛顿（冷气）推进器和电容致动调整卫星和测试质量相对对准的无阻力控制系统。

其它 “太极计划”和“天琴计划”的检测频率均与 LISA 相近。“太极计划”选择与 LISA 相同的太阳轨道三颗星方案，但在 0.01 Hz-1.0 Hz 频段的灵敏度要高于 LISA；而“天琴计划”选择受地球重力场影响较大的地球轨道三颗星方案。DECIGO 和 BBO[30]均旨在检测地面干涉仪与 LISA 之间的频段，以探测大爆炸初期产生的引力波。二者均采用太阳轨道三颗星的方案，探测频率相近，仅敏感带宽有所不同。

总体来说，每个探测器都有自己的定位和特色，但地面探测器主要检测 1 Hz 到 1000 Hz 之间的中高频段，空间探测器主要检测 0.1 mHz 到 1 Hz 的中低频段。现将主要探测器及其特点归纳为表 1。

表 1 主要激光干涉仪引力波探测器及其特点

Tab1 The main laser interferometer gravitational wave detectors and their characteristics

名称	臂长	工作频率	分类	国家
LIGO	4 km	10 Hz-1 kHz	地面	美、澳、德、英、印
VIRGO	3 km	10 Hz-6 kHz	地面	意、法
GEO	0.6 km	50 Hz-1.5 kHz	地面	英、德
KAGRA	3 km	尤合适 100 Hz 以下	地下；低温	日、韩、台
ET	10 km	1 Hz-10 kHz	地下；低温	欧盟
LISA	5×10^6 km	0.1 m Hz-1 Hz	空间；太阳轨道	欧盟、美
太极计划	3×10^6 km	0.1 mHz -1 Hz 0.01 Hz-1Hz 灵敏度优于 LISA	空间；太阳轨道	中国
天琴计划	1.7×10^5 km	0.1 mHz ~ 0.1 Hz	空间；地球轨道	中国
DECIGO	1×10^3 km	1 mHz-100 Hz 尤适合 0.1 Hz-10 Hz	空间；太阳轨道	日本
BBO	5×10^4 km	1 mHz-100 Hz	空间；太阳轨道	美国

尤适合 0.1 Hz-1 Hz

3　引力波探测器运营模式

LIGO LIGO 主要由美国国家科学基金会提供支持，其中高级 LIGO 也得到德国马克斯-普朗克学会、英国科学与技术设施委员会、德国下萨克森州、澳大利亚研究理事会的资助。

LIGO 由 LIGO 实验室和 LIGO 科学合作组织（LIGO Scientific Collaboration，LSC）共同组成。LIGO 实验室由加州理工学院、麻省理工学院、LIGO Hanford 和 LIGO Livingston 组成，负责实验运行操作探测器，研究、开发、提高探测器的功能，开展公众教育和宣传。LSC 负责引力波探测、使用引力波数据探索引力基础物理、发展引力波探测的工具。作为开放性科学合作组织，LSC 目前由来自全球 18 个国家 100 多个机构的 1000 多名科学家组成。比如，联合 LIGO 实验室、Atlas 机群、雪城大学等机构为 LIGO 项目提供计算机资源 GEO600 团队为高级 LIGO 开发测试多项关键技术。从战略层面来看，LSC 的研究目标涵盖引力波科学的各个方面，包括大型引力波探测器的设计、开发和表征，数据分析技术的发展以及使用探测器数据搜索引力波的算法，探索引力波搜索对天体的影响并进行必要的基础研究和应用研究，并开发可以探测更深宇宙的未来引力波探测器。有兴趣加入 LSC 的准成员，必须与 LIGO 实验室和 LSC 达成谅解备忘录，并在 LSC 会议上提出其拟议的合作计划。此外，还需经 LSC 理事会的三分之二多数投票通过。

LIGO 实验室与 LSC 密不可分。LIGO 实验室作为 LSC 的最大成员在 LSC 中扮演特殊角色，而 LSC 成员在 LIGO 实验室中也扮演着特殊角色。例如，LSC 发言人是 LIGO 实验室理事会的成员，该理事会则负责 LSC 的科学发展。LIGO 实验室完全参与 LSC 的整个发展过程，担任 LCS 的许多领导职位，并且 LIGO 实验室遵循 LSC 的规则进行出版、演讲和与更大的科学界共享 LIGO 数据。反过来，LIGO 科学合作组织对实验室的任务也做出了重大贡献，包括开发引力波探测器、运行天文台、推动相关领域的发展。

引力波开放科学中心（Gravitational Wave Open Science Center，GWOSC）是 LIGO（与 GEO60、Virgo 一起）提供引力波观测数据的网络平台。借助 GWOSC，LIGO 得以履行对更广泛的科学界和公众发布、存档和提供 LIGO 数据的承诺，并提供研究和使用数据所需的使用教程和软件工具。GWOSC 数据已获得知识共享署名 4.0 国际许可，如果科学工作者在研究中使用了相关数据需按照特定格式对数据来源进行引用说明，以保证 LIGO 的权益。

其它　Virgo 项目由法国国家科学研究所中心、意大利国家核物理研究所和荷兰亚原子物理研究所资助并得到波兰和匈牙利等研究机构的支持，由欧洲引力波天文台托管，其运行模式与 LIGO 大致相似。不同之处在于，Virgo 科学合作组织不仅负责探测数据的研究工作，还负责探测器的设计、建造、操作。Virgo 团队与 LSC 在包括数据交换的许多领域存在合作。GEO600 项目由德国马克斯·普朗克学会和英国科学技术设施理事会资助，由马克斯·普朗克引力物理

研究所和汉诺威莱布尼兹大学的科学家以及英国的合作伙伴设计和运行，其运营模式与 LIGO 类似。GEO600 项目与 LIGO 项目也存在密切合作，并与 LIGO 共同组成 LSC 探测网络。KAGRA 由日本国家天文台、高能加速器研究组织资助并得到韩国、台湾的支持，由东京大学、国立天文台、京都大学等机构的研究小组联合建造，由东京大学的宇宙射线研究所运营。2019 年 10 月 KAGRA 与 LIGO、Virgo 之间签订了包括联合探测和数据共享在内的研究合作协议备忘录，目前也在广泛呼吁全球科研人员入其合作组织联合开展研究。

4　引力波探测器建设的经验启示

（1）激光干涉仪引力波探测器的建设是长期化工程，有助于推动科研容错机制和科学评价机制的完善发展

激光干涉仪引力波探测器作为大型基础设施，其筹备和建设往往经历几十年时间（从时间跨度来看，LIGO 从立项至检测到信号历时 40 多年；Virgo 从筹备至检测到信号历时 40 多年；从 TAMA 开始建造至 KAGRA 建成历时 25 年；从提出 LISA 至 LISA 发射升空也将历时 40 年）。并且，项目建设还可能经历方案调整或设备升级，甚至设备升级之后仍然可能无法有效检测信号。在长达几十年的时间里，科研项目管理的耐心和智慧必将经受严峻的考验，建设合理的容错机制和科学的评价机制以促进大型基础设施的健康发展显得十分必要。

（2）激光干涉仪引力波探测器的建设是高科技工程，有助于推动多学科技术协同发展

激光干涉仪引力波探测器是系统化的高科技工程，其建设和维护依赖高度发展的激光技术、隔振技术、真空技术、计算机技术、晶体镀膜技术、超高精密自控技术、新材料技术、低温技术等。目前我国在激光技术、晶体镀膜技术、超高精密自控技术、计算机技术等领域发展滞后。在“太极计划”、“天琴技术”等项目建设期间，通过积极整合国内有关科技力量协同创新，将有效促进激光技术、晶体镀膜技术、超高精密自控技术、计算机技术等多学科技术快速发展。

（3）激光干涉仪引力波探测器的建设是国际化工程，有助于推动科研合作健康发展

激光干涉仪引力波探测器作为大型基础设施，其建设和运营需要大量的资金支持和智力支持。从资金来源来看，LIGO 得到美国、澳大利亚、德国、英国、印度等国支持；Virgo 由意法联合建造；GEO600 由英德联合建造；KAGRA 得到日本、韩国、台湾等地区支持；eLISA 得到欧洲和美国的支持。从运营模式来看，LIGO、Virgo、GEO600、KAGRA 等均成立科学合作组织，吸收全球就科研机构和人员参与科研合作和管理。目前我国同时开展“太极计划”和“天琴计划”，资金方面、智力方面面临的挑战不容忽视。因此，广泛联合国内外资金资源、智力资源，开展既广且深的科研合作，进一步巩固自身的资金和智力条件，不失为发展我国建设激光干涉仪引力波探测器的有效途径。

致谢

感谢中国科学院精密测量科学与技术研究院王谨研究员对本论文的指导！

参考文献

[1]EINSTEIN A 1997. Approximate Integration of the Field Equations of Gravitation (1916). Translated in Engel, A.(ed.) The Collected Papers of Albert Einstein, vol. 6 [M]. Princeton University Press, Princeton.

[2]Physicist: Nobel Prize Awarded for the Discovery of Gravitational Waves.[EB/OL]. [2020-06-24]. https://chelorg.com/2017/10/02/physicist-nobel-prize-awarded-for-the-discovery-of-gravitational-waves/

[3]LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, ABBOTT B P, et al. Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger[J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 061102.

[4]LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, ABBOTT B P, et al. GW151226: Observation of Gravitational Waves From a 22-solar-mass Binary Black Hole Coalescence[J]. Physical Review Letters, 2016, 116: 241103.

[5]ABBOTT B P, ABBOTT R, ABBOTT T D, et al. Gravitational Waves and Gamma-Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A[J]. The Astrophysical Journal, 2017, 848: L13.

[6]罗子人, 白姗, 边星,等. 空间激光干涉引力波探测[J]. 力学进展, 2013, 043: 415-447.

LUO Ziren, BAI Shan, BIAN Xing, et al. Gravitational Wave Detection by Space Laser Interferometry[J]. Advances in Mechanics, 2013, 043: 415-447.

[7]王运永, 朱兴江, 刘见, 等. 激光干涉仪引力波探测器[J]. 天文学进展, 2014(3), 348-382.

WANG Yunyong, ZHU Xingjiang, LIU Jian, et al. The Laser Interferometer Gravitational Wave Detector[J]. Progress in Astronomy, 2014(3), 348-382.

[8]冯衍. 激光干涉引力波探测器——人类的宇宙助听器[J]. 物理, 2016(45): 17-23.

FENG Yan. Laser Interferometer Gravitational-wave Detectors——hearing aids for human on deep universe[J]. Physics, 2016(45): 17-23.

[9] 李永贵,张晓莉,李英民.激光干涉仪引力波探测器中的光学技术进展[J].中国科学:物理学 力学 天文学,2017,47(01):23-37.

LI Yonggui, ZHANG Xiaoli, LI Yingmin. Progress of the Optical Techniques for Laser Interferometer Gravitational Wave Detector[J]. SCIENTIA SINICA Physica,Mechanica & Astronomica,2017,47(01):23-37.

[10]胡文瑞. 空间引力波探测方案的探讨[J]. 科技导报, 2018, 36(12): 1.

HU Wenrui. Program Investigation on Gravitational Wave Detection in Space[J]. Science & Technology Review, 2018, 36(12): 1.

[11]唐川, 房俊民, 田倩飞. 支撑引力波探测的信息技术基础设施:LIGO 的经验与启示[J]. 世界科技研究与发展, 2017, 39(06): 463-466.

TANG Chuan, FANG Junmin, TIAN Qianfei. IT Infrastructure behind Gravitational Wave Detection: LIGO Experiences and Implications[J]. World Sci-Tech R & D,

2017, 39(06): 463-466.
[12]张志强. 国际科学技术前沿报告 2018 [M]. 北京：科学出版社, 2018:45-70
ZHANG Zhiqiang. International Science and Technology Frontier Report 2018[M]. Beijing: Science Press, 2018:45-70
[13]王颖. 空间探测激光干涉仪在太空中寻找黑洞[J]. 激光与光电子学进展, 2001(02): 23-25.
WANG Ying. Space exploration laser interferometer searching for black holes in space [J]. LASER & OPTRONICS PROGRESS，2001(02): 23-25.
[14]李芳昱, 文毫. 引力波与引力波探测:一个全新的空间信息通道[J]. 物理实验, 2019, 39(05): 1-7,16.
LI Fangyu, WEN Hao. Gravitational Wave and Its Detection: A New Spatial Information Channel[J]. Physics Experimentation, 2019, 39(05): 1-7,16.
[15]周雁翎. 大科学时代的大发现需要大资金、大投入、大协作——以引力波探测为例[J]. 科技导报, 2016, 34(489): 44-46.
ZHOU Yanling. Great discoveries in the age of big science requiring big capital, big investment, and big collaboration—taking gravitational wave detection as an example [J]. Science & Technology Review, 2016, 34(489): 44-46.
[16]Weiss R. Quarterly Progress Report: Electromagnetically Coupled Broadband Gravitational Antenna[R]. Massachusetts: Research Laboratory of Electronics, Massachusetts Institute of Technology,1972.
[17]http://tamago.mtk.nao.ac.jp/spacetime/tama300_e.html, 20110701.
[18]http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/gr/GWPOHPe/clio-e.html.
[19]BARRIGA P, BLAIR D G, COWARD D M, et al. AIGO: a Southern Hemisphere Detector for the Worldwide Array of Ground-based Interferometric Gravitational Wave Detectors [J]. Classical and Quantum Gravity, 2010, 27(8): 084005.
[20] Hu W R, Wu Y L. The Taiji Program in Space for Gravitational Wave Physics and the Nature of Gravity[J]. National Science Review, 2017,4(5):685-686.
[21] Luo J, Chen L S, Duan H Z,et al. TianQin: a Space-borne Gravitational Wave Detector[J]. Classical and Quantum Gravity,2016,33(3):035010.
[22] Kawamura S, Nakamura T, Ando M. The Japanese Space Gravitational Wave Antenna—DECIGO[J]. Classical and Quantum Gravity,2006,23(8):S125-S131.
[23] White N E. Beyond Einstein: Scientific Goals and Missions[J]. Advances in Space Research,2005,35(1):96-105.
[24]https://www.ligo.caltech.edu/.
[25]http://www.virgo-gw.eu/.
[26]http://www.geo600.org/.
[27]https://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/en/.
[28]http://www.et-gw.eu/.
[29]https://www.elisascience.org/.
[30] Harry G M, Fritschel P, Shaddock D A, et al. Laser Interferometry for the Big Bang Observer[J]. Classical and Quantum Gravity, 2006,23(15):4487-4894.

作者贡献说明

蒿巧利：确定文章框架，收集主要资料及整理，撰写稿件；

赵晏强：收集部分运营模式资料，修改稿件；

周伯柱：收集部分建设历程资料，修改稿件；

李印结：文章选题及稿件修改。